

INDAGINE SPERIMENTALE SUGLI EFFETTI PRODOTTI DALLE VARIAZIONI DEL LIVELLO MEDIO DEL MARE SULLE RETI DI CANALI A MAREA

L. Stefanon¹, A. Rinaldo^{1,2} & L. D'Alpaos¹

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale, Università di Padova, Italia, e-mail: stefanon@idra.unipd.it, dalpaos@idra.unipd.it
(2) Laboratory of Ecohydrology ECHO/IEE/ENAC, Ècole Polytechnique Fédérale Lausanne, Lausanne, Svizzera, e-mail: andrea.rinaldo@epfl.ch

SOMMARIO

Le reti di canali giocano un ruolo fondamentale sull'evoluzione eco-morfodinamica degli ambienti a marea, la cui conservazione è strettamente legata ad una migliore comprensione dei meccanismi di adattamento delle reti alle variazioni cicliche del livello medio del mare e, quindi, alla previsione dell'evoluzione nel lungo periodo delle reti stesse. Nel presente contributo si illustrano i primi tentativi di studio dei meccanismi di adattamento delle reti a marea alle variazioni del livello medio del mare, condotti su di un modello fisico che riproduce in scala ridotta un ambiente lagunare con fondali costituiti da materiale incoerente. La riduzione e il successivo aumento del prisma di marea, conseguenti all'abbassamento e all'aumento del livello medio di propagazione della marea stessa, portano, rispettivamente, a una contrazione e a una successiva riespansione della rete, durante la quale i canali tendono a colonizzare le medesime porzioni di bacino lagunare occupate dalla rete prima dell'abbassamento del livello medio, seguendo peraltro percorsi non sempre coincidenti con quelli abbandonati dai canali durante la fase di contrazione della rete. I risultati sperimentali evidenziano la tendenza a sviluppare una relazione lineare tra il prisma di marea e la densità di drenaggio delle reti osservate nel corso di un ciclo di abbassamento/innalzamento del livello medio di propagazione.

1 INTRODUZIONE

Le reti di canali che incidono gli ambienti a marea naturali esercitano un ruolo di primaria importanza sull'evoluzione ecomorfodinamica dei sistemi a marea, controllandone l'idrodinamica, il trasporto dei sedimenti e la circolazione interna dei nutrienti e degli inquinanti. Una migliore comprensione dei meccanismi di adattamento delle reti di canali a marea alle variazioni cicliche del livello medio del mare permetterebbe di prevedere l'evoluzione nel lungo periodo delle reti stesse e, quindi, di assumere decisioni strategiche per la conservazione degli ambienti a marea.

I principali meccanismi morfodinamici responsabili dell'incisione e della successiva evoluzione delle reti a marea non sono stati ancora ben delineati se confrontati con quelli relativi alle reti fluviali (Howard *et al.*, 1994), in particolar modo per quanto riguarda l'adattamento delle reti stesse alle forzanti esterne (Rigon *et al.*, 1994; Rinaldo *et al.*, 1995).

Negli ultimi anni diversi autori hanno proposto modelli matematici in grado di descrivere la morfogenesi e il successivo sviluppo delle reti a marea (ad esempio, Redfield, 1965; Allen, 1997; Perillo *et al.*, 2005; Hood, 2006; D'Alpaos *et al.*, 2007b; Hughes *et al.*, 2009) e solo in un paio di casi questi processi sono stati analizzati utilizzando modelli fisici in scala ridotta (Stefanon *et al.*, 2010; Vlaswinkel & Cantelli, 2011). La sperimentazione condotta sui modelli fisici ha dimostrato come gli esperimenti di laboratorio possano essere utilizzati con successo per modellare la dinamica delle reti a marea e consentano la formazione di reti sintetiche che presentano caratteristiche morfologiche simili alle reti che solcano gli ambienti a marea reali. Gli esperimenti di laboratorio, quindi, potrebbero aiutare a chiarire gli effetti delle variazioni cicliche del livello medio del mare sulle caratteristiche e sulla struttura delle reti a marea, già indagati con l'ausilio di modelli concettuali (ad esempio, Allen, 1997) e numerici (D'Alpaos *et al.*, 2007a; Kirwan & Murray, 2007), ma non ancora completamente compresi.

In questo lavoro sono illustrati i risultati preliminari della risposta delle reti a marea alle variazioni del livello medio del mare, relativi ad alcuni esperimenti di laboratorio condotti su di un modello fisico riprodotto in scala ridotta un tipico ambiente lagunare (Stefanon *et al.*, 2010). L'impiego dei modelli fisici per lo studio di queste problematiche consente la loro analisi su tempi scala relativamente brevi, se confrontati con quelli che coinvolgono gli ambienti a marea reali. Inoltre, la sperimentazione condotta all'interno di un ambiente di laboratorio controllato consente di isolare gli effetti delle variazioni del medio mare sull'evoluzione delle reti dai processi fisici e biologici che, agendo su scale temporali e spaziali diverse (Rinaldo *et al.*, 1999a,b; Feola *et al.*, 2005), contribuiscono a modellare gli ambienti a marea naturali, sovrapponendosi ai primi. I risultati ottenuti dalla sperimentazione sui modelli fisici in scala ridotta potrebbero, infine, fornire un ulteriore supporto alla modellazione matematica degli ambienti a marea, che, a vari livelli, necessariamente concettualizza e semplifica i processi reali.

2 METODOLOGIE DI ANALISI

L'analisi sperimentale è stata condotta sul modello fisico in scala ridotta di una laguna schematica realizzato presso il Dipartimento ICEA dell'Università di Padova (Fig. 1). L'apparato sperimentale è costituito da due bacini contigui, che riproducono rispettivamente il mare e la laguna. Il bacino della laguna, di dimensioni $5.20 \times 4.00 \text{ m}^2$, è posto in comunicazione con il mare attraverso una sola bocca, attualmente collocata in posizione centrale. Il fondo del bacino è ricoperto da uno spessore di circa 30 cm di sedimenti incoerenti, costituiti da materiale plastico, aventi un diametro medio d_{50} pari a 0.8 mm e una densità specifica ρ_S pari a 1041 kg/m^3 . La marea è generata facendo variare i livelli nel bacino del mare mediante una paratoia in acciaio oscillante verticalmente, guidata da un software implementato appositamente al fine di riprodurre un'onda di marea perfettamente sinusoidale. Una descrizione dettagliata dell'apparato sperimentale utilizzato nel corso di questi esperimenti è contenuta in Stefanon *et al.* (2010).

Sulla base dei risultati di una serie di prove preliminari condotte sul sistema è emerso che, partendo da una condizione iniziale piana ed orizzontale del fondo, le reti di canali si formano per piccoli valori dell'ampiezza dell'onda di marea (1-2 cm), per periodi di oscillazione della marea di 8-12 minuti e per livelli medi di propagazione tali da consentire la concentrazione del flusso all'interno dei canali, in particolare nelle fasi di massimo

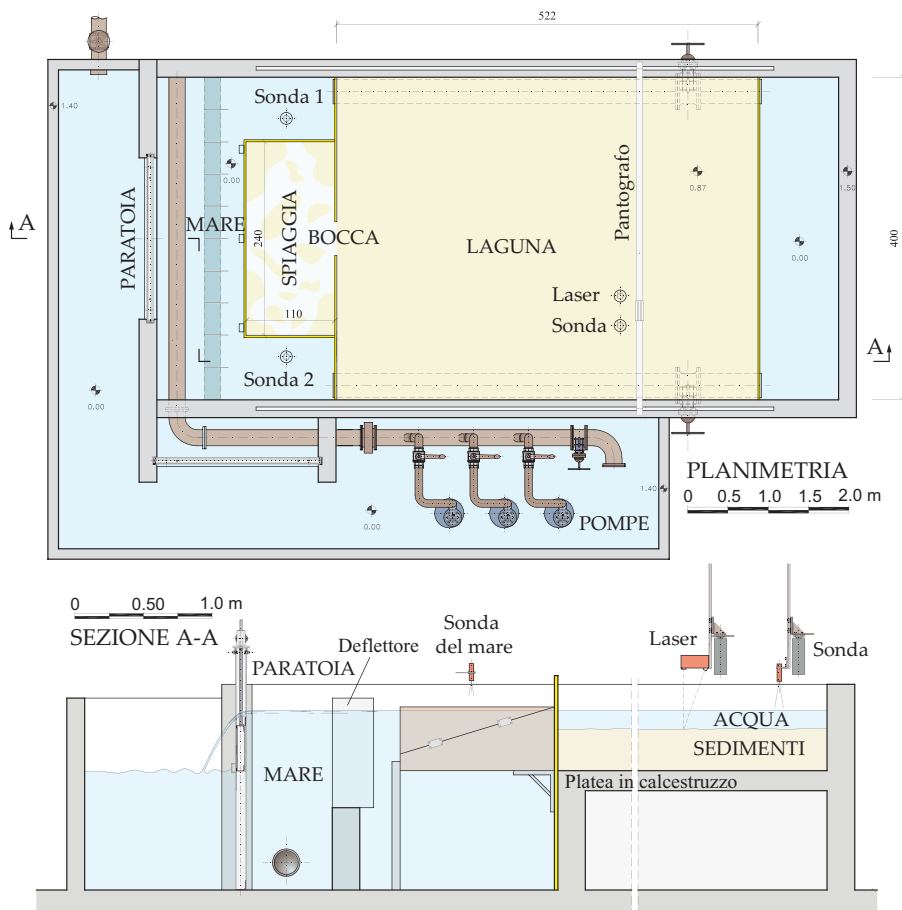


Figura 1. Schema dell'apparato sperimentale utilizzato negli esperimenti.

riflusso della marea. Il trasferimento al reale dei dati sperimentali è possibile mediante l'applicazione di opportuni rapporti di scala, la cui derivazione è descritta in *Stefanon et al. (2010)* e *Stefanon (2011)*.

La mancanza di apporto esterno di sedimenti, la prevalenza di trasporto solido al fondo e l'assenza di vegetazione rendono impossibile qualsiasi processo di accrescimento della superficie all'interno dell'apparato sperimentale. Per questi motivi, nel corso degli esperimenti si verifica immancabilmente una perdita netta di sedimenti verso il mare. Conseguentemente, la formazione della rete è strettamente legata a meccanismi di erosione differenziale del fondale tra i canali e i bassifondi adiacenti.

La progressiva erosione del bacino, contemporanea al mantenimento di un valore costante del livello medio, comporta un graduale incremento del prisma di marea scambiato tra il bacino stesso e il mare. Nell'ipotesi di mantenere invariate le forzanti mareali imposte all'inizio dell'esperimento, dopo un certo numero di cicli di marea, variabile da prova a prova, la rete raggiunge la sua configurazione di equilibrio, caratterizzata da variazioni

trascurabili della propria geometria. La condizione di equilibrio della rete si realizza indicativamente quando il prisma di marea scambiato tra la laguna e il mare raggiunge il suo valore massimo. All'interno dell'apparato sperimentale descritto, pertanto, la riduzione del prisma di marea può essere simulata solo attraverso una riduzione del livello medio di propagazione della marea, mentre l'incremento del prisma di marea può essere ottenuto sia attraverso l'incremento del livello medio, sia come conseguenza della progressiva e generalizzata erosione del fondo che si realizza nel corso della prova sperimentale.

L'analisi morfologica delle reti sperimentali proposta in questo contributo si fonda su due parametri caratteristici della morfodinamica, ovvero il prisma di marea P , scambiato tra il bacino lagunare e il mare, e la densità di drenaggio della rete di canali.

Nell'ipotesi di oscillazione praticamente statica dei livelli all'interno del bacino, più che accettabile nel caso in questione, P può essere calcolato come $P = \int_S [H - \max(\mathbf{z}, h)] dS$, dove S rappresenta la superficie del bacino, H e h sono rispettivamente il massimo e il minimo livello raggiunto dalla marea alla bocca e \mathbf{z} rappresenta la quota locale del fondo.

Per quanto riguarda la densità di drenaggio della rete di canali, essa è calcolata seguendo l'approccio proposto da *Marani et al.* (2003), che esprime la densità di drenaggio della rete come l'inverso della lunghezza media fuori rete. Le lunghezze fuori rete ℓ di un bacino rappresentano il percorso che connette ogni punto non canalizzato al canale idraulicamente più vicino e sono determinate sulla base delle direzioni di drenaggio definite dai gradienti idrodinamici (*Rinaldo et al.*, 1999a).

3 RISULTATI SPERIMENTALI

Allo scopo di analizzare gli effetti prodotti dalle variazioni del medio mare sull'evoluzione delle reti di canali è stata condotta una prova sperimentale di durata complessiva pari a circa 13000 cicli di marea, nel corso della quale sono state imposte alcune variazioni del livello medio di propagazione della marea.

L'esperimento inizia facendo propagare all'interno del bacino una marea sinusoidale di ampiezza 1 cm e periodo 8 minuti, oscillante attorno a un livello medio di propagazione coincidente con la quota iniziale del fondo, che all'avvio dell'esperimento si presenta piano e orizzontale. L'ampiezza e il periodo della marea, scelti in modo tale da garantire il carattere tipicamente mareale di onda lunga in acque basse, sono mantenuti costanti nel corso dell'intero esperimento. Il livello medio adottato, inoltre, favorisce la concentrazione del flusso all'interno dei canali durante l'intero ciclo di marea e in particolar modo nella fase di massimo riflusso, durante la quale i processi di incisione dei canali risultano più significativi.

L'inevitabile presenza di piccole depressioni localizzate nella configurazione iniziale del fondo favorisce la concentrazione del flusso al proprio interno, contribuendo a una prima incisione del bacino (Fig. 2a). L'incisione conseguente produce un'ulteriore concentrazione del flusso, dando origine a un meccanismo di retroazione positiva che porta ben presto alla formazione di una rete di canali a marea, in accordo con quanto osservato da *Fagherazzi & Furbish* (2001). A causa del carattere puramente erosivo della laguna sperimentale, la formazione della rete è strettamente collegata alla progressiva riduzione delle quote del fondo, che comporta, a sua volta, un incremento del prisma scambiato dal bacino con il mare. In questa prima fase di evoluzione, la rete si sviluppa principalmente attraverso tre processi: (i) l'allungamento dei canali per "headward growth"; (ii) l'inc-

mento del grado di incisione e della sinuosità dei canali al progredire dei cicli di marea; (iii) la formazione di nuove ramificazioni (Fig. 2b).

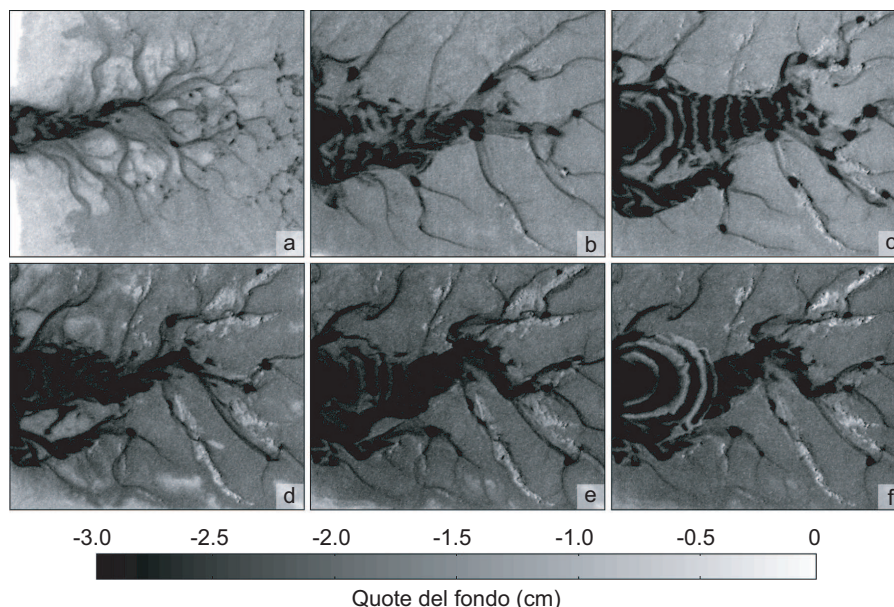


Figura 2. Evoluzione della batimetria del fondo nel corso dell'esperimento. (a) 133 cicli; (b) 1752 cicli; (c) 9351 cicli; (d) 9631 cicli; (e) 11355 cicli; (f) 12459 cicli. Le quote del fondo sono riferite al valore iniziale del livello medio di propagazione della marea.

Dopo circa 9350 cicli di marea la rete raggiunge la sua condizione di equilibrio (Fig. 2c), caratterizzata da variazioni trascurabili della propria geometria e da un valore costante del prisma di marea scambiato dal bacino.

A questo punto si è deciso di abbassare il livello medio di propagazione della marea allo scopo di analizzare gli effetti di tale abbassamento sulla geometria della rete e sulle sezioni dei canali. La riduzione del livello medio imposta è pari a 1 cm su 10 cicli di marea (1 mm per ciclo), ovvero tale per cui ampie zone di bassofondo risultano scoperte in fase di riflusso.

L'abbassamento del livello medio produce una contrazione della rete molto rapida, in termini sia di larghezza che di lunghezza dei canali, chiaramente visibile già dopo appena un centinaio di cicli di marea. I canali "contratti", inoltre, risultano più incisi e caratterizzati da alvei meglio delineati.

La riduzione del livello medio di propagazione della marea incrementa i processi di erosione, sia all'interno dei canali sia sui bassifondi adiacenti (Fig. 3). Ciò comporta, a sua volta, una riduzione della quota media del bacino nel tempo, evidenziata dal progressivo aumento dell'estensione delle porzioni di bacino soggette alla sommersione nelle varie fasi del ciclo di marea. Come conseguenza dell'abbassamento, inoltre, il canale centrale riduce la propria larghezza e lo scavo alla bocca diventa molto più contenuto rispetto alla situazione precedente. Mantenendo costante il livello medio, al diminuire della quota

media del fondo il prisma di marea scambiato con il mare dalla laguna aumenta progressivamente e la velocità di crescita della rete si riduce nel tempo. Tale comportamento, conseguente al carattere puramente erosivo del bacino sperimentale, riproduce di fatto un incremento del livello medio di propagazione della marea.

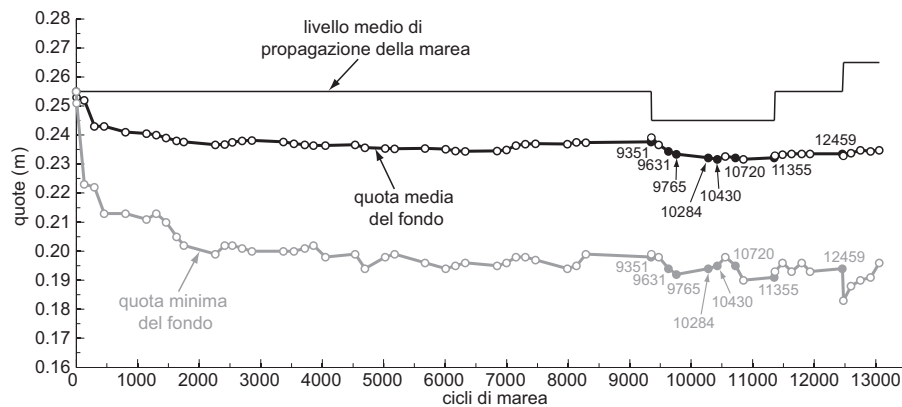


Figura 3. Andamento della quota media e della quota minima del fondo nel modello fisico della laguna al progredire dei cicli di marea.

Come conseguenza del processo descritto, dopo circa 9630 cicli (Fig. 2d) tutto il bacino risulta nuovamente sommerso in ogni fase del ciclo di marea. Il canale centrale e lo scavo alla bocca ricominciano ad allargarsi, mentre gli altri canali presentano un tracciato più chiaramente delineato e una sinuosità più accentuata. Alcuni dei canali accorciati si appena dopo l'abbassamento del livello medio, evolvono modificando il proprio tracciato o creando nuove ramificazioni rispetto alla configurazione che presentavano precedentemente.

L'evoluzione della rete continua lentamente con le stesse modalità descritte nella prima fase della prova, raggiungendo dopo circa 11350 cicli di marea una nuova configurazione che risulta abbastanza stabile. A questo punto si è proceduto ad aumentare il livello medio di propagazione della marea di 1 cm su 10 cicli di marea, allo scopo di analizzare gli effetti di una tale variazione su di una rete già ben incisa e abbastanza stabile.

L'innalzamento del livello medio produce variazioni di qualche rilievo solo in corrispondenza della bocca. Le variazioni osservate consistono in un aumento dello scavo, in termini sia altimetrici sia planimetrici, e in una conseguente estensione planimetrica della zona interessata dalle forme di fondo. Ad eccezione di piccoli effetti locali, riconducibili in buona sostanza alla scomparsa delle incisioni laterali più piccole e del riempimento di qualche canale in pochi punti, la rete complessivamente si "congela" (Fig. 2f).

Dal momento che gli effetti prodotti sulla rete dalla variazione del livello medio risultano pressochè nulli, dopo circa 1100 cicli si è proceduto ad aumentare ancora di 1 cm il livello medio di propagazione della marea, allo scopo di valutare se un incremento superiore può dar luogo a modifiche della struttura della rete più importanti di quelle precedentemente osservate. Quest'ultimo aumento del livello medio di propagazione della marea non produce ulteriori effetti, se non in corrispondenza della bocca, dove si appro-

fondisce lo scavo e si estendono le forme di fondo. Anche in questo caso l'incremento del livello medio porta sostanzialmente a un "congelamento" della rete.

4 ANALISI DEI RISULTATI E CONCLUSIONI

I meccanismi di evoluzione delle reti a marea riprodotti sperimentalmente sono in sostanziale accordo con i modelli concettuali (French & Stoddart, 1992; Allen, 1997) e numerici (D'Alpaos *et al.*, 2007a; Kirwan & Murray, 2007) di evoluzione delle reti proposti da vari autori.

I risultati sperimentali ottenuti evidenziano che la riduzione del prisma di marea scambiato dal bacino con il mare, causato dall'abbassamento del livello medio, produce una contrazione della rete (Fig. 4a), che si esplica attraverso il riempimento di parte dei canali con i sedimenti erosi dai bassifondi adiacenti (Fig. 3). Al contrario, quando il prisma aumenta per effetto della progressiva erosione del fondo del bacino la rete si riespande e i canali subiscono un incremento delle proprie sezioni trasversali (Fig. 4b). In alcuni casi la rete evolve ripercorrendo i tracciati dei vecchi canali, in altri, invece, i canali sembrano "congelare" le proprie posizioni e allungarsi creando nuove ramificazioni (Fig. 4c). In ogni caso i canali evolvono rioccupando le stesse porzioni di bacino abbandonate durante la fase di contrazione, raggiungendo la stessa efficienza di drenaggio che caratterizzava la rete prima della contrazione.

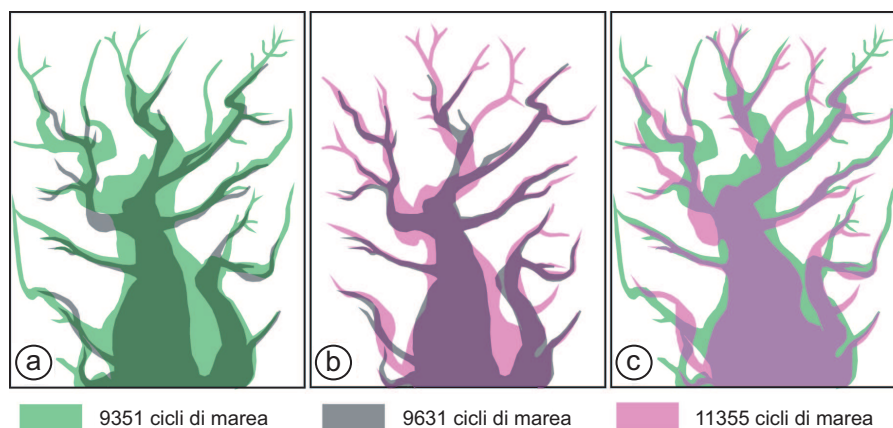


Figura 4. Confronto tra la configurazione raggiunta dalla rete prima dell'abbassamento del livello medio (in verde), la rete contratta conseguente all'abbassamento (in grigio) e la rete che si è riscavata dopo circa 2000 cicli dall'abbassamento (in viola).

La contrazione della rete produce un incremento della lunghezza fuori rete media e quindi una riduzione della densità di drenaggio della rete stessa, contemporanea alla riduzione del prisma di marea. Durante la successiva fase di erosione del fondo, che equivale a un incremento implicito del livello medio, la densità di drenaggio aumenta progressivamente con l'aumentare del prisma di marea fluente nella rete. Questo comportamento è meglio comprensibile riportando su di un grafico il valore raggiunto dalla densità di drenaggio della rete al variare del prisma di marea (Fig. 5). Sulla base dei risultati ottenuti,

si può ragionevolmente supporre che, se l'evoluzione della rete non fosse stata bloccata dopo 2000 cicli di marea dall'abbassamento del livello medio (12459 cicli dall'inizio dell'esperimento), verosimilmente i punti successivi si sarebbero progressivamente avvicinati al punto rappresentativo della condizione precedente alla variazione del livello medio, fino a sovrapporsi ad esso. L'incremento del livello medio effettuato dopo 12459 cicli dall'inizio dell'esperimento, infatti, comporta l'improvviso incremento del prisma di marea fino al suo valore massimo, che produce, a sua volta, una apprezzabile riduzione dello sforzo tangenziale indotto dalle correnti di marea sul fondo del bacino, congelando la configurazione raggiunta dalla rete.

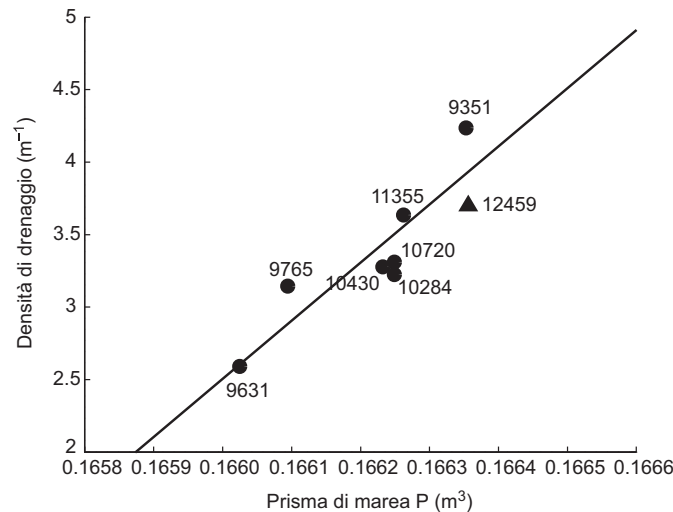


Figura 5. Relazione tra la densità di drenaggio e il prisma di marea in diverse fasi del processo di contrazione ed espansione della rete di canali.

La relazione lineare tra densità di drenaggio e prisma di marea illustrata in Fig. 5 suggerisce l'esistenza di una risposta ciclica della rete alle variazioni del livello medio in termini di efficienza di drenaggio del bacino. Questo risultato è qualitativamente in accordo con le conclusioni ricavate da *Marani et al.* (2003) per un certo numero di ambienti a marea reali di diversa estensione. E' da segnalare, tuttavia, che l'analisi condotta da *Marani et al.* (2003) si riferisce a reti a marea appartenenti a siti diversi, mentre l'analisi descritta nel presente lavoro si riferisce a fasi di evoluzione diverse della stessa rete a marea. Inoltre, la diversa lunghezza fuori rete media evidenziata per alcune reti appartenenti allo stesso sito analizzate da *Marani et al.* (2003) suggerisce l'esistenza contemporanea di vari processi bio-geomorfologici (come, ad esempio, la crescita della vegetazione e del microphytobenthos, la natura coesiva dei sedimenti, l'apporto di sedimenti di natura minerale e organica) che, attualmente, non possono essere riprodotti sull'apparato sperimentale allestito.

Come è già stato osservato, lo sviluppo della rete successivo alla sua contrazione segue percorsi parzialmente diversi dai tracciati che caratterizzavano i canali in precedenza. Pertanto, il processo di contrazione e successiva riespansione della rete è da considerarsi

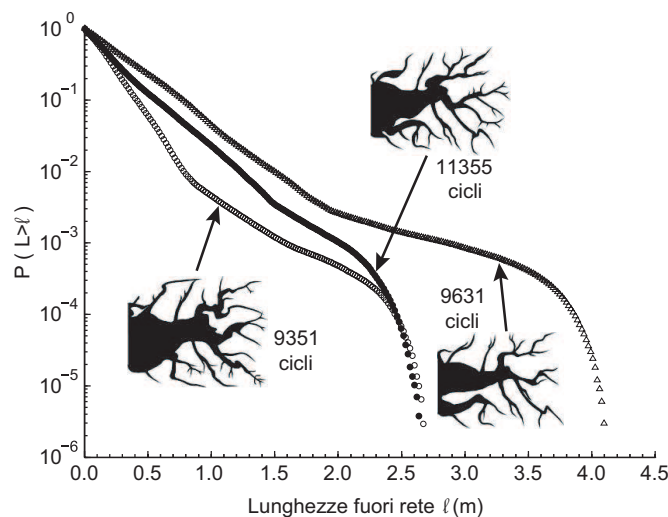


Figura 6. Distribuzione di probabilità delle lunghezze fuori rete di alcune configurazioni caratteristiche della rete durante il processo di contrazione ed espansione.

ciclico solo se lo si analizza da un punto di vista statistico. In Fig. 6 è illustrata la distribuzione di probabilità delle lunghezze fuori rete in tre fasi caratteristiche dell'evoluzione dei canali durante il processo di contrazione/espansione. Il grafico evidenzia un decadimento esponenziale delle tre curve, in accordo con quanto osservato da *Marani et al.* (2003). La lunghezza fuori rete media nelle varie fasi di evoluzione del bacino è data dalla pendenza delle rette che compaiono sul grafico semilogaritmico. Dall'analisi dello stesso grafico emerge, inoltre, che le distribuzioni di probabilità delle lunghezze fuori rete all'inizio e alla fine del processo di contrazione/espansione tendono a sovrapporsi l'una all'altra. La lunghezza fuori rete media della configurazione finale tende, pertanto, a raggiungere il valore precedente alla contrazione.

La contrazione/espansione della rete prodotta dalle variazioni del prisma di marea è strettamente legata a una riduzione/allargamento delle sezioni trasversali dei canali (Fig. 7). In particolare, la relazione fra la sezione trasversale alla bocca, Ω , e il prisma di marea, P , segue la legge di O'Brien-Jarrett-Marchi (*D'Alpaos et al.*, 2009). La legge di O'Brien-Jarrett-Marchi è una relazione, inizialmente dedotta per via empirica (*O'Brien*, 1969; *Jarrett*, 1976) e successivamente inquadrata anche da un punto di vista teorico (*Marchi*, 1990; *Hughes*, 2002), che tenta di esprimere il complesso legame che intercorre fra alcuni parametri complessivi del campo di moto idrodinamico e le caratteristiche morfologiche della bocca e dei canali interni (*Friedrichs*, 1995; *Rinaldo et al.*, 1999b; *D'Alpaos et al.*, 2010).

E' da evidenziare che mentre molti modelli concettuali e numerici di evoluzione delle reti a marea, in presenza o meno di vegetazione (*Redfield*, 1965; *Allen*, 1997; *Hood*, 2006; *Kirwan & Murray*, 2007; *Temmerman et al.*, 2007; *Hughes et al.*, 2009), considerano anche l'apporto di sedimenti proveniente dai fiumi o dal mare, tale contributo non è riproducibile mediante l'apparato sperimentale qui utilizzato. Al riguardo si deve se-

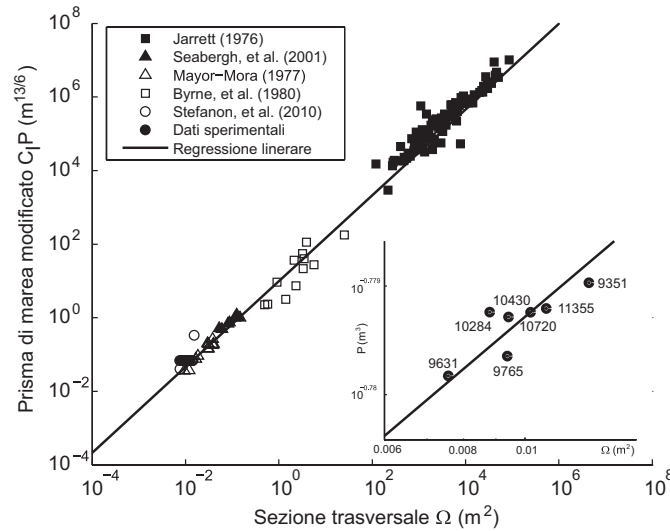


Figura 7. Relazione tra prisma di marea e sezione trasversale alla bocca per alcune configurazioni caratteristiche dell'evoluzione della rete di canali.

gnalare che secondo alcuni autori i processi di deposito dei sedimenti rappresentano il principale meccanismo morfodinamico responsabile della nascita ed evoluzione delle reti a marea (Redfield, 1965; Hood, 2006), mentre secondo altri il processo morfodinamico principale è rappresentato dall'erosione dei fondali (Fagherazzi & Sun, 2004; Perillo et al., 2005; D'Alpaos et al., 2005, 2007b; Vlaswinkel & Cantelli, 2011).

Nello scenario di tipo erosivo, la formazione della rete è strettamente legata a meccanismi di erosione differenziale del fondale dei canali e dei bassifondi adiacenti. L'erosione differenziale dipende dalla distribuzione planimetrica degli sforzi tangenziali al fondo e, quindi, dall'entità dell'eccedenza della soglia di incipiente movimento dei sedimenti.

Al contrario, nello scenario di accrescimento del fondo per deposito di sedimenti, il processo responsabile della formazione della rete di canali è la deposizione differenziale, che si esplica attraverso il deposito preferenziale di sedimenti laddove gli sforzi tangenziali al fondo sono più deboli.

Nei due scenari descritti, che sembrano apparentemente distinti, i meccanismi di evoluzione morfologica delle reti sono in realtà gli stessi: in entrambi i casi, infatti, la distribuzione degli sforzi tangenziali è la condizione essenziale che controlla sia l'erosione differenziale sia la deposizione differenziale.

E' da ultimo opportuno ricordare che l'analisi sperimentale proposta non considera alcuni aspetti fondamentali per la formazione di una rete di canali in un ambiente a marea reale, come, ad esempio, i processi connessi alla crescita della vegetazione e alla produzione del microphytobenthos, l'apporto esterno di sedimenti e gli effetti legati alla coesione dei sedimenti. Gli sviluppi futuri del lavoro si concentreranno proprio su questi aspetti, in particolar modo sugli effetti indotti sulla nascita e sullo sviluppo della rete dalla presenza della vegetazione (ad esempio la alfalfa) all'interno dell'apparato sperimentale descritto.

Pur con qualche limite, l'analisi di un bacino a marea puramente erosivo, come quello descritto nel presente contributo, può fornire una valida interpretazione dei principali fenomeni morfodinamici responsabili dell'evoluzione di ambienti a marea reali. In particolare, gli esperimenti illustrati possono considerarsi un ulteriore supporto allo studio della dinamica delle reti a marea soggette a variazioni del livello medio del mare e, in particolare, all'interpretazione delle tracce lasciate sugli ambienti lagunari dai cambiamenti climatici del passato.

BIBLIOGRAFIA

- Allen, J.R.L., Simulation models of salt-marsh morphodynamics: some implications for high-interval sediment couplets related to sea-level change, *Sediment. Geol.*, 1997, 113, 211–233.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Bonometto, A., Cecconi, G. & Rinaldo, A., Spontaneous tidal network formation within a constructed salt marsh: observations and morphodynamic modelling, *Geomorphology*, 2007b, 91, doi:10.1016/j.geomorph.2007.04.013.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M., Fagherazzi, S. & Rinaldo, A., Tidal network ontogeny: channel initiation and early development, *J. Geophys. Res.*, 2005, 110.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M. & Rinaldo, A., Landscape evolution in tidal embayments: modeling the interplay of erosion sedimentation and vegetation dynamics, *J. Geophys. Res.*, 2007a, 112, doi:10.1029/2006JF000537.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M. & Rinaldo, A., On the O'Brien-Jarrett-Marchi law, *Rendiconti Lincei - Scienze Fisiche e Naturali*, 2009, 20, 225–236, doi:10.1007/s12210-009-0052-x.
- D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M. & Rinaldo, A., On the tidal prism-channel area relations, *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, doi:10.1029/2008JF001243.
- Fagherazzi, S. & Furbish, D.J., On the shape and widening of salt-marsh creeks, *Journal of Geophysical Research*, 2001, 106(C1), 991–1003.
- Fagherazzi, S. & Sun, T., A stochastic model for the formation of channel networks in tidal marshes, *Geophys. Res. Lett.*, 2004, 31, doi:10.1029/2004GL020965.
- Feola, A., Belluco, E., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Marani, M. & Rinaldo, A., A geomorphic study of lagoonal landforms, *Water Resour. Res.*, 2005, 41(W06019).
- French, J.R. & Stoddart, D.R., Hydrodynamics of saltmarsh creek system: implications for marsh morphological development and material exchange, *Earth Surf. Processes Landforms*, 1992, 17, 235–252.
- Friedrichs, C.T., Stability shear stress and equilibrium cross-sectional geometry of sheltered tidal channels, *J. Coastal Res.*, 1995, 11, 1062–1074.
- Hood, W.G., A conceptual model of depositional, rather than erosional, tidal channel development in the rapidly prograding skagit river delta (Washington, USA), *Earth Surf. Processes Landforms*, 2006, 31, 1824–1838.
- Howard, A., Dietrich, W. & Seidl, M., Modeling fluvial erosion on regional to continental scales, *J. Geophys. Res.*, 1994, 99(B7), 13.971–13.986.
- Hughes, S.A., Equilibrium cross sectional area at tidal inlets, *Journal of Coastal Research*, 2002, 18, 160–174.
- Hughes, Z.J., FitzGerald, D.M., Wilson, C.A., Pennings, S.C., Wieski, K. & Mahadevan, A., Rapid headward erosion of marsh creeks in response to relative sea level rise, *Geophys. Res. Lett.*, 2009, 36(L03602), doi:10.1029/2008GL036000.
- Jarrett, J.T., Tidal prism-inlet area relationships, gen. invest. tidal inlets, rep. 3, Technical report, U.S. Army Coastal Engineering Research Center, Fort Belvoir, VA. and U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, MS, 1976.

- Kirwan, M. & Murray, B., A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution, *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 2007, 104(15), 6118–6122.
- Marani, M., Lanzoni, S., Belluco, E., D'Alpaos, A., Defina, A. & Rinaldo, A., On the drainage density of tidal networks, *Water Resour. Res.*, 2003, 39(2), 105–113.
- Marchi, E., Sulla stabilità delle bocche lagunari a marea, *Rend. Fis. Mat. Acc. Linc.*, 1990, 9, 137–15.
- O'Brien, M.P., Equilibrium flow areas of inlets in sandy coasts, *J. Waterw. Harbors Coastal Eng. Div. ASCE*, 1969, 95, 43–52.
- Perillo, G., Minkoff, D. & Piccolo, M., Novel mechanism of stream formation in coastal wetlands by crab fish groundwater interaction, *Geo-Marine Lett.*, 2005, 25, 214–220.
- Redfield, A.C., Ontogeny of a salt marsh estuary, *Science*, 1965, 147, 50–55.
- Rigon, R., Rinaldo, A. & Rodriguez-Iturbe, I., On landscape self organization, *J. Geophys. Res.*, 1994, 99, 11,971–11,993.
- Rinaldo, A., Dietrich, W.E., Vogel, G., Rigon, R. & Rodriguez-Iturbe, I., Geomorphological signatures of varying climate, *Nature*, 1995, 374, 632–636.
- Rinaldo, A., Fagherazzi, S., Lanzoni, S., Marani, M. & Dietrich, W.E., Tidal networks 2. Watershed delineation and comparative network morphology, *Water Resour. Res.*, 1999a, 35(12), 3905–3917.
- Rinaldo, A., Fagherazzi, S., Lanzoni, S., Marani, M. & Dietrich, W.E., Tidal networks 3. Landscape-forming discharges and studies in empirical geomorphic relationships, *Water Resour. Res.*, 1999b, 35(12), 3919–3929.
- Stefanon, L., Analisi sperimentale sulla nascita e sullo sviluppo di reti a marea generate in laboratorio, Ph.D. thesis, Scuola di dottorato in Scienze dell'ingegneria civile e ambientale, 2011.
- Stefanon, L., Carniello, L., D'Alpaos, A. & Lanzoni, S., Experimental analysis of tidal network growth and development, *Cont. Shelf Res.*, 2010, 30, 950–962, doi:10.1016/j.csr.2009.08.018.
- Temmerman, S., Bouma, T.J., Van de Koppel, J., Van der Wal, D., De Vries, M.B. & Herman, P.M.J., Vegetation causes channel erosion in a tidal landscape, *Geology*, 2007, 35(7), 631–634.
- Vlaswinkel, B. & Cantelli, A., Geometric characteristics and evolution of a tidal channel network in experimental setting, *Earth Surf. Proc. Landforms*, 2011, 36(6), 739–752.